

Високоточний п'єзоелектричний гравіметр автоматизованої авіаційної гравіметричної системи для вимірювань аномалій прискорення сили тяжіння

© О. М. Безвесільна¹, А. Г. Ткачук², М. А. Войцицький², 2015

¹ Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»,
Київ, Україна

² Житомирський державний технологічний університет, Житомир, Україна
Надійшла 16 лютого 2015 р.

Представлено членом редколегії В. І. Старостенко

Рассмотрен новый пьезоэлектрический гравиметр автоматизированной авиационной гравиметрической системы (АГС), точность (1 мГал) и быстродействие (полностью автоматизированный) которого выше известных в настоящее время. Описан принцип действия пьезоэлектрического гравиметра, основанный на физическом явлении прямого пьезоэффекта, и выведена его математическая модель. Показано, что путем подбора конструктивных параметров чувствительного элемента пьезоэлектрического гравиметра можно установить его собственную частоту 0,1 рад/с и избежать необходимости использовать фильтр низких частот в составе автоматизированной АГС. Проанализированы перспективы дальнейшего повышения точности нового пьезоэлектрического гравиметра.

Ключевые слова: пьезоэлектрический гравиметр, авиационная гравиметрическая система, ускорение силы тяжести, пьезоэффект, чувствительный элемент.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її актуальність. Інформацію про гравітаційне поле Землі, тобто про фізичне поле, зумовлене тяжінням маси Землі і відцентровою силою, яка виникає внаслідок добового обертання Землі, використовують у гравіметрії, сейсмології, авіаційній і космічній техніці, геології, археології тощо. У класичній фізиці гравітаційне поле описують одним потенціалом і напруженістю. Напруженість гравітаційного поля збігається з прискоренням сили тяжіння [Веселов, 1968; Безвесільна, Ткачук, 2013].

Для визначення характеристик гравітаційного поля Землі, тобто прискорення сили тяжіння g_z , найзручніше використовувати авіаційні гравіметричні системи (АГС), чутливим елементом яких є гравіметр. За допомогою АГС можна здобути гравіметричну інформацію у важкодоступних районах земної кулі набагато швидше та з меншими витратами, ніж за допомогою інших гравіметричних засобів або систем [Безвесільна, 2007; Безвесильная, Ткачук, 2014; Bezvesilna et al., 2014].

Ефективність роботи АГС значною мірою забезпечується вибором чутливого елемента системи — гравіметра. Найвідоміші гравіметри АГС на сьогодні такі: кварцовий ГАЛ-С, роз-

роблений Аерогравіметричною лабораторією в Інституті фізики Землі Російської академії наук; кварцовий П 1/1, розроблений «Раменським приладобудівним заводом»; струнний «Гравітон-М», розроблений ДНВП «Аерогеофізика» разом із МДТУ ім. М. Баумана та «ВНДІГеофізика»; кварцовий «Чекан-АМ», розроблений ВАТ концерн «ЦНДІ «Електроприлад»; магнітні МАГ-1 та ГТ-1А, розроблені у ПАТ «Гравіметричні технології» та «Canadian Micro Gravity» відповідно; гіроскопічні PIGA 16, PIGA 25, розроблені у Массачусетському технологічному інституті. Точність перелічених гравіметрів недостатня: 3—10 мГал. Швидкодія їх також мала. Вони не автоматизовані. Результати обробляють після польоту літака (ЛА) на Землі протягом тривалого часу. До того ж ці гравіметри вимірюють разом із прискоренням сили тяжіння вертикальне прискорення \dot{h} . Високоточне вимірювання \dot{h} є складною науково-технічною проблемою і вимагає застосування додаткових фільтрів. У НТУУ «КПІ» розроблено та досліджено автоматизовані гіроскопічні вимірювачі g_z . Однак точність їх недостатня (2 мГал) [Безвесільна, Ткачук, 2013; Bezvesilna, Tkachuk, 2014].

Тому актуальним науково-технічним за-

вданням є підвищення точності та швидкодії вимірювань прискорення сили тяжіння в результаті створення нового гравіметра автоматизованої АГС.

Розвиток методів і засобів гравіметричних вимірювань в Україні. У розвиток методів і засобів гравіметричних вимірювань значний внесок зробили наукові школи, сформовані в ННЦ «Інститут метрології» під керівництвом к. е. н. О. С. Дудолада, в НТУУ «КПІ» під керівництвом д-ра техн. наук О. М. Безвесільної [Безвесільна, 2007; Bezvesilna, Tkachuk, 2014; Bezvesilna et al., 2013a].

Успіхи в авіаційній гравіметрії були б неможливими без досягнень у галузі інерціальних систем навігації (ІСН) і чутливих елементів ІСН, висвітлених у наукових працях школи видатних учених НТУУ «КПІ» А. А. Одинцова, М. А. Павловського, О. В. Збруцького, Б. Б. Самотокіна, В. В. Карачуна, Л. М. Рижкова, В. М. Мельник та інших.

Мета статті — надати опис конструкції та особливостей нового п'єзоелектричного гравіметра (ПГ) автоматизованої авіаційної гравіметричної системи, який має вищу точність та швидкодію, ніж відомі нині гравіметри.

Викладення основного матеріалу дослідження. На кафедрі приладобудування НТУУ «КПІ» під керівництвом О. М. Безвесільної розроблено новий п'єзоелектричний гравіметр (ПГ) автоматизованої авіаційної гравіметричної системи [Пат. 99084..., 2012], який має точність 1 мГал. Чутливий елемент ПГ (рис. 1) складається із п'єзоелектричного елемента (ПЕ) 5, що працює на деформації стиснення—розтягування, ізоляторів 7 на торцях ПЕ та інерційної маси (ІМ) 6. З метою підвищення надійності та міцності конструкції чутливий елемент пружно притиснений до основи 8 гвинтом 10. ПГ за допомогою кабелю 11 з'єднаний із операційним підсилювачем. П'єзоелектричний елемент 5 є багатопшаровою конструкцією (п'єзопакет), що складається із шарів кристалічного ніобату літію.

Розглянемо коливальну систему ПГ, яка включає такі елементи: ІМ (m), елемент жорсткості (k) та демпфівувальний елемент (n) (рис. 2). Останнім є повітря, яке створює опір руху ІМ. Елемент жорсткості характеризується пружними властивостями ПЕ [Безвесільна, Ткачук, 2013].

На ІМ діє сила, яка, відповідно до другого закону Ньютона, дорівнює

$$G = mg_z, \quad (1)$$

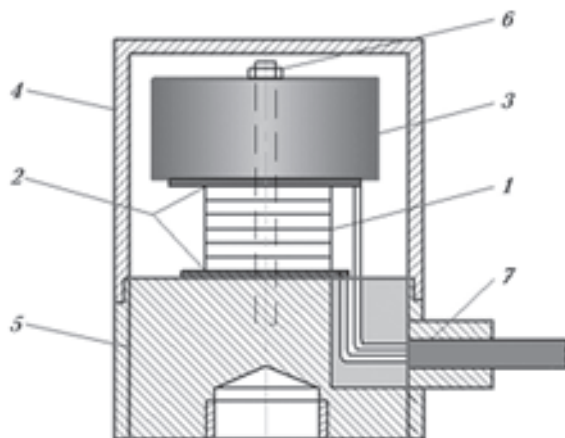


Рис. 1. Конструкція п'єзоелектричного гравіметра: 1 — п'єзоелектричний елемент; 2 — ізолятори; 3 — інерційна маса; 4 — основа; 5 — герметичний корпус; 6 — гвинт; 7 — вивідний кабель.

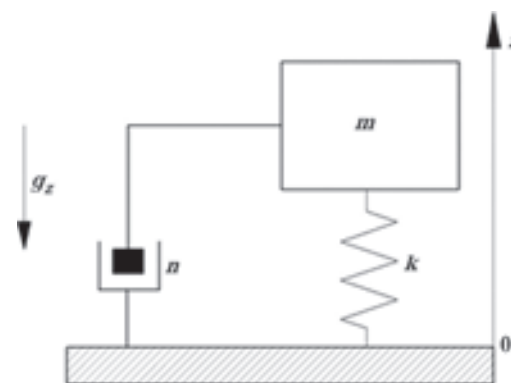


Рис. 2. Коливальна система п'єзоелектричного гравіметра.

де G — сила тяжіння, яка діє на ІМ; m — вага ІМ.

Під час руху ІМ на неї діють також сила пружності ПЕ, сила опору руху та інерційна сила від дії вертикального прискорення ЛА.

Сила пружності ПЕ, відповідно до закону Гука, дорівнює

$$F_{пр} = -kx, \quad (2)$$

де $F_{пр}$ — сила пружності ПЕ; k — коефіцієнт пружності, який залежить від властивостей ПЕ.

Сила $F_{оп}$ опору руху ІМ становить

$$F_{оп} = -n \frac{dx}{dt}, \quad (3)$$

де n — коефіцієнт опору (затухання).

З урахуванням рівнянь (1)—(3) отримаємо

$$mg_z = -n \frac{dx}{dt} - kx.$$

Кінцеве рівняння руху ПГ з урахуванням інерційної сили $F_i = m \frac{d^2x}{dt^2}$ матиме вигляд

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + n \frac{dx}{dt} + \kappa x = -mg_z .$$

Через інерційність конструкції ПГ двома першими складовими у подальшому нехтуватимемо. Запишемо рівняння руху ПГ за умов установки на Землі:

$$g_z = -\frac{\kappa}{m} x .$$

За умов установки ПГ на ЛА складову $m \frac{d^2 x}{dt^2}$ треба враховувати.

Розглянемо рівняння руху автоматизованої АГС для визначення аномалії прискорення сили тяжіння Δg [Безвесільна, 2007; Безвесільна, Ткачук, 2014]:

$$\Delta g = f_z + \frac{v^2}{r} \left\{ 1 - 2e \left[1 - 2 \cos^2 \varphi \left(1 - \frac{\sin^2 k}{2} \right) \right] \right\} +$$

$$+ 2\omega_3 v \sin k \cos \varphi - 2\frac{h}{r} e v \cos k \sin 2\varphi +$$

$$+ 2\frac{\gamma_0 h}{r} + \omega_3^2 h \cos^2 \varphi - \ddot{h} - \gamma_0 ,$$

де f_z — вихідний сигнал ПГ; v — швидкість ЛА; r — радіус місцезнаходження ЛА; e — стиск еліпсоїда; φ — географічна широта; k — курс ЛА; ω_3 — кутова швидкість обертання Землі; h — висота ЛА над еліпсоїдом; \dot{h} — вертикальна швидкість ЛА; \ddot{h} — вертикальне прискорення ЛА; γ_0 — довідкове значення прискорення сили тяжіння.

Запишемо рівняння руху АГС у вигляді

$$\Delta g = f_z + E + A - \ddot{h} - \gamma_0 ,$$

де f_z — вихідний сигнал гравіметра АГС;

$$E = \frac{v^2}{r} \left\{ 1 - 2e \left[1 - 2 \cos^2 \varphi \left(1 - \frac{\sin^2 k}{2} \right) \right] \right\} +$$

$$+ 2\omega_3 v \sin k \cos \varphi - 2\frac{h}{r} e v \cos k \sin 2\varphi$$

— поправка Етвеша;

$$A = 2\frac{\gamma_0 h}{r} + \omega_3^2 h \cos^2 \varphi$$

— поправка за висоту; $\gamma_0 = \gamma_{0e} (1 + 0,0052884 \sin^2 \varphi - 0,0000059 \sin^2 2\varphi)$ — довідкове значення прискорення сили тяжіння; $\gamma_{0e} = 9,78049 \text{ м/с}^2$ — довідкове екваторіальне значення прискорення сили тяжіння.

Вихідний сигнал гравіметра АГС після обчислення і введення поправок E , A та γ_0 можна записати у вигляді

$$T = f_z = g_z + \sigma_{\dot{h}} ,$$

де $\sigma_{\dot{h}}$ — похибка від впливу вертикального прискорення ЛА.

У публікаціях [Безвесільна, 2007; Безвесільна, Коваль, 2013] наведено аналітичні вирази спектральних щільностей корисного сигналу $G_{\Delta g}(\omega)$ і вертикального прискорення ЛА $G_{\dot{h}}(\omega)$ та побудовано їх графіки (рис. 3).

Із рис. 3 видно, що за частот, менших за 0,1 рад/с, система літак—автопілот суттєво зменшує ефекти впливу вертикального при-

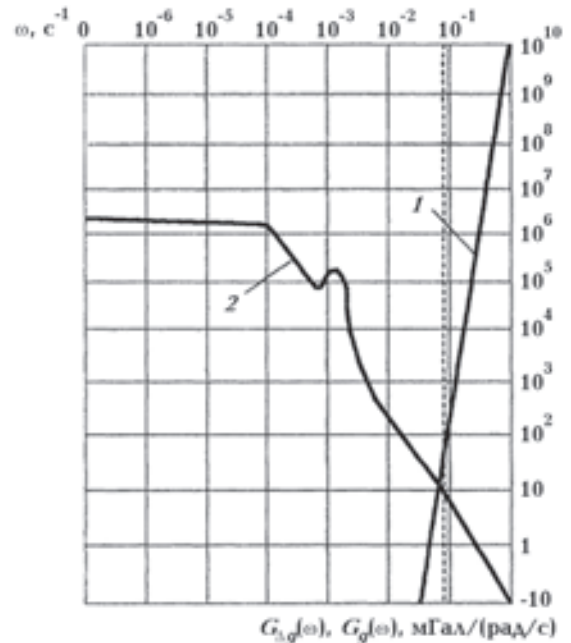


Рис. 3. Графік спектральної густини корисного сигналу (2) і вертикального прискорення ЛА (1)

скорення; за частот понад 0,1 рад/с спектральна густина вертикального прискорення прямує до нескінченності. Тому необхідно забезпечити процес фільтрації вихідного сигналу ПГ із частотою 0,1 рад/с. Найпоширенішим методом конструктивної реалізації цього процесу у відомих гравіметрів є використання низькочастотних фільтрів із частотою зрізу 0,1 рад/с. Однак за умов, за якими передбачена експлуатація ПГ, робота електронних компонентів фільтра стає нестабільною, що змінює його частоту зрізу. Зрештою фільтр починає пропускати завади на вихід ПГ або не пропускати частину корисного сигналу взагалі. Тому наявність фільтра низьких частот як окремого блока у складі гравіметра суттєво зменшує насамперед надійність приладу та точність.

Запропоновано спосіб фільтрації вихідного сигналу ПГ за рахунок створення чутливого елемента нового гравіметра автоматизованої АГС у вигляді п'єзопакета, частота власних коливань ω_0 якого дорівнює найбільшій частоті гравітаційних прискорень, що може бути виміряна на фоні перешкод, — 0,1 рад/с:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{s_n E_n}{h_n m}} = 0,1 \text{ рад/с},$$

де m — вага інерційної маси; s_n , E_n і h_n — площа, модуль пружності матеріалу і висота п'єзоелемента відповідно.

Саме за допомогою низькочастотної фільтрації з частотою зрізу 0,1 рад/с можна відокремлювати g_z від \dot{h} із точністю 1 мГал. При цьому у вихідному сигналі ПГ також усуваються інші компоненти збурень, переважна частота яких більша за 0,1 рад/с. До таких збурень належать поступальні віброприскорення, переважна частота яких 3140 рад/с; кутові віброприскорення, переважна частота яких понад 0,1 рад/с [Пат. 105949..., Bezvesilnaya et al., 2013b, 2014].

Перспективи подальшого підвищення точності та швидкодії нового п'єзоелектричного гравіметра автоматизованої АГС. Чутливий елемент нового ПГ [Пат. 99084..., 2012], як уже зазначалось, є одноканальним і виконаний у вигляді набору п'єзопластин. Частота влас-

них коливань чутливого елемента дорівнює 0,1 рад/с. При цьому п'єзопластини ПГ виконують функції чутливого елемента та фільтра низьких частот одночасно, відокремлюючи корисний сигнал прискорення сили тяжіння від високочастотних завад (переважно це вертикальне прискорення ЛА). Однак конструкція нового ПГ не передбачає компенсацію інструментальних похибок від впливу зміни температури, вологості та тиску зовнішнього середовища, що є значними за екстремальних умов, якими характеризуються гравіметричні вимірювання на ЛА.

Тому для компенсації інструментальних похибок запропоновано зробити новий ПГ двоканальним. Для цього чутливий елемент виконано з двома каналами, в кожному з яких встановлено по одному п'єзоелементу. П'єзоелементи обох каналів є ідентичними і виконані у вигляді п'єзопластин та інерційної маси, що закріплені один на одному. П'єзоелемент 3 одного каналу розташовано п'єзопластинами вниз, а п'єзоелемент 4 іншого каналу — п'єзопластинами вгору. Виходи п'єзопластин обох каналів з'єднані з входами суматора 5, вихід якого з'єднаний із входом пристрою 2 обчислення вихідного сигналу гравіметра (рис. 4).

Двоканальний ПГ працює у такий спосіб. На п'єзоелементи обох каналів діє прискорення сили тяжіння g_z , вертикальне прискорення \dot{h} ЛА та інструментальні похибки Δi від впливу

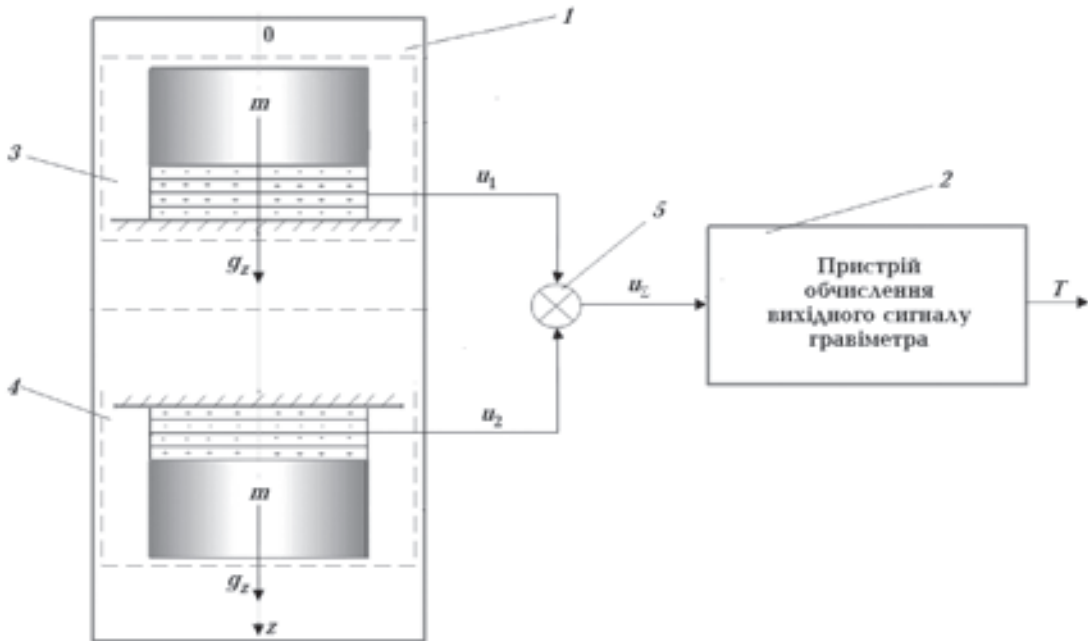


Рис. 4. Структурна схема двоканального п'єзоелектричного гравіметра.

залишкової неідентичності конструкцій однакових п'єзопластин і мас, від впливу зміни температури, вологості і тиску зовнішнього середовища. Якщо спроектувати всі ці впливи на вимірювальну вісь Oz ПГ і врахувати те, що п'єзоелемент 3 одного каналу працює на стиснення, а п'єзоелемент 4 іншого каналу — на розтяг, то отримуємо

$$u_1 = k(mg_z + m\ddot{h} + \Delta i);$$

$$u_2 = k(mg_z - m\Delta\ddot{h} - \Delta i),$$

де u_1 — вихідний електричний сигнал п'єзопластин одного каналу; u_2 — вихідний електричний сигнал п'єзопластин іншого каналу; m — вага інерційної маси у кожному каналі; k — п'єзоелектрична стала.

Вихідні електричні сигнали u_1 та u_2 п'єзопластин обох каналів підсумовуюються у суматорі 5:

$$u_\Sigma = u_1 + u_2 = 2kmg_z,$$

де u_Σ — вихідний сигнал суматора 5.

Вихідний сигнал u_Σ суматора 5 подається у пристрій 2 обчислення вихідного сигналу гравіметра, де він обчислюється за певний інтервал

часу. У кінцевому результаті отримуємо вихідний сигнал T пристрою 2 обчислення вихідного сигналу ПГ, який містить подвоєний сигнал прискорення сили тяжіння. У ньому повністю відсутні такі похибки вимірювань, які спричинені впливом вертикального прискорення \dot{h} та інструментальних похибок Δi . Отже, точність двоканального ПГ буде значно вищою.

Висновки. Розглянуто новий п'єзоелектричний гравіметр автоматизованої АГС, який має більшу точність (1 мГал) та швидкодію (повністю автоматизований), ніж відомі на сьогодні. Описано принцип дії п'єзоелектричного гравіметра та виведено його математичну модель. Підбором конструктивних параметрів чутливого елемента п'єзоелектричного гравіметра можна встановити його власну частоту 0,1 рад/с і уникнути необхідності використовувати фільтр низьких частот у складі автоматизованої АГС. Проаналізовано перспективи подальшого підвищення точності нового п'єзоелектричного гравіметра шляхом реалізації процесу компенсації інструментальних похибок від впливу зміни температури, вологості та тиску зовнішнього середовища, значного за екстремальних умов, якими характеризуються гравіметричні вимірювання на ЛА.

Список літератури

- Безвесільна О. М. Авіаційні гравіметричні системи та гравіметри. Житомир: ЖДТУ, 2007. 604 с.
- Безвесільная Е. Н., Ткачук А. Г. Авиационная гравиметрическая система. Сборка в машиностроении, приборостроении. 2014. № 6. С. 32—37.
- Безвесільна О. М., Ткачук А. Г. П'єзоелектричний гравіметр авіаційної гравіметричної системи. Житомир: ЖДТУ, 2013. 240 с.
- Безвесільна О. М., Коваль А. В. Двогіроскопний гравіметр автоматизованої авіаційної гравіметричної системи. Житомир: ЖДТУ, 2013. 252 с.
- Безвесільна О. М., Остапчук О. О., Тимчик Г. С. Автоматизований лазерний балістичний гравіметр. Житомир: ЖДТУ, 2014. 180 с.
- Веселов К. Е. Гравиметрическая разведка. Москва: Недра, 1968. 512 с.
- Пат. 99084 Україна. П'єзогравіметр. О. М. Безвесільна, А. Г. Ткачук. Опубл. 10.07.2012, Бюл. № 13.
- Пат. 105949 Україна. Авіаційна гравіметрична система для вимірювань аномалій прискорення сили тяжіння. О. М. Безвесільна, А. Г. Ткачук. Опубл. 10.07.2014, Бюл. № 13.
- Bezvesilna O. M., Tkachuk A. G., 2014. Corrected gyrocompass synthesis as a system with changeable structure for aviation gravimetric system with piezoelectric gravimeter. *Aviation* (18), 134—140. doi:10.3846/16487788.2014.969878.
- Bezvesilna O. M., Tkachuk A. G., Chepyuk L. O., Ostapchuk O. O., 2013a. Angle measurement device for posting the sensitivity axis of aviation gravimeter. *Adv. Sci. J.* (12), 31—37.
- Bezvesilna O. M., Tkachuk A. G., Kozko K. S., 2013b. System for airborne gravimetry. *Eur. Appl. Sci. J.* (5), 37—40.
- Bezvesilna O. M., Tkachuk A. G., Chepyuk L. O., Ostapchuk O. O., 2014. Electromechanical gravimeter. *Adv. Sci. J.* (7), 45—48, doi: 10.15550/ASJ.2014.07.045.

High-precision piezoelectric gravimeter of automated aviation gravimetric system for measurements of anomalies of gravity acceleration

© E. N. Bezvesilna, A. G. Tkachuk, M. A. Voytsitskiy, 2015

A new piezoelectric gravimeter of automated aviation gravimetric system (AGS), which has higher accuracy (1 mGal) and speed (fully automated) than known to date, is considered in this article. The principle of work of the piezoelectric gravimeter based on the physical phenomenon of direct piezoelectric effect is described and its mathematical model is derived. It has been established that by choosing the design parameters of the piezoelectric sensing element of piezoelectric gravimeter we can set its own frequency of 0.1 rad/s and avoid the need for a low-pass filter in automated AGS. The prospects for further improving the accuracy of a new piezoelectric gravimeter are analyzed.

Key words: piezoelectric gravimeter, aviation gravimetric system, gravity acceleration, piezoelectric effect, sensor element.

References

- Bezvesilna O. N., 2007. Aviation gravimetric systems and gravimeters. Zhytomyr: ZSTU, 604 p. (in Ukrainian).
- Bezvesilnaya E. N., Tkachuk A. G., 2014. Aviation gravimetric system. *Sborka v mashinostroenii, priboroostroenii* (6), 32—37 (in Russian).
- Bezvesilna O. M., Tkachuk A. G., 2013. Piezoelectric gravimeter of aviation gravimetric system. Zhytomyr: ZSTU, 240 p. (in Ukrainian).
- Bezvesilna O. M., Koval A. V., 2013. Twogyro gravimeter of automated aviation gravimetric system. Zhytomyr: ZSTU, 252 p. (in Ukrainian).
- Bezvesilna O. M., Ostapchuk O. O., Tymchyk G. S., 2014. Automated laser ballistic gravimeter. Zhytomyr: ZSTU, 180 p. (in Ukrainian).
- Veselov K. E., 1968. Gravimetric exploration. Moscow: Nedra, 512 p. (in Russian).
- Pat. 99084 Ukraine, 2012. Piezogravimeter. O. M. Bezvesilna, A. G. Tkachuk. Published 10.07.2012. Bull. № 13 (in Ukrainian).
- Pat. 105949 Ukraine, 2014. Aviation Gravimetric system for measuring the gravity anomalies. O. M. Bezvesilna, A. G. Tkachuk. Published 10.07.2014. Bull. № 13 (in Ukrainian).
- Bezvesilna O. M., Tkachuk A. G., 2014. Corrected gyrocompass synthesis as a system with changeable structure for aviation gravimetric system with piezoelectric gravimeter. *Aviation* (18), 134—140. doi:10.3846/16487788.2014.969878.
- Bezvesilna O. M., Tkachuk A. G., Chepyuk L. O., Ostapchuk O. O., 2013a. Angle measurement device for posting the sensitivity axis of aviation gravimeter. *Adv. Sci. J.* (12), 31—37.
- Bezvesilna O. M., Tkachuk A. G., Kozko K. S., 2013b. System for airborne gravimetry. *Eur. Appl. Sci. J.* (5), 37—40.
- Bezvesilna O. M., Tkachuk A. G., Chepyuk L. O., Ostapchuk O. O., 2014. Electromechanical gravimeter. *Adv. Sci. J.* (7), 45—48, doi: 10.15550/ASJ.2014.07.045.